

# 局部根区灌溉水氮耦合对设施黄瓜生长及土壤中硝态氮分布的影响

祝鹏飞, 武 燊, 束良佐, 刘 飞, 朱克亚, 郭加汛

(淮北师范大学 生命科学学院 资源植物生物学安徽省重点实验室, 安徽 淮北 235000)

**摘 要:** 通过对设施黄瓜进行灌水量、灌溉方式、水氮根区位置的不同耦合, 研究了局部根区灌溉下不同水氮耦合措施对设施黄瓜生长、土壤中硝态氮分布及累积的影响。结果表明, 灌水量、灌溉方式、水氮根区供应位置对黄瓜地上部生物量及产量存在着不同的交互作用。亏缺灌溉量处理的地上部生物量及产量均低于相应灌溉方式下的正常水量处理。相同灌溉量处理条件下, 交替根区灌溉的黄瓜生物量与产量显著高于两侧均水均氮处理, 以正常交替水氮异区处理黄瓜地上部生物量及果实产量最大, 分别达到  $1\ 143\ \text{kg}/\text{hm}^2$  (干重) 和  $1.75 \times 10^5\ \text{kg}/\text{hm}^2$  (鲜重); 而固定根区灌溉下, 尤其在水氮异区条件下, 生物量与产量则下降。在亏缺灌溉量下, 交替根区灌溉处理的黄瓜生物量以及产量与常规充足灌溉处理没有显著差异。在正常灌溉量条件下, 通过对局部根区灌溉下不同水氮耦合对土壤中硝态氮分布的分析表明, 施氮是造成土壤中硝态氮积累的原因, 土壤水分的垂向运动是影响硝态氮向下淋洗的一个主要因子。固定水氮同区、交替水氮同区处理硝态氮向下淋洗较强, 水氮异区处理硝态氮向下淋洗相对较弱。交替水氮异区处理氮素主要累积在 0—110 cm 土层, 深层累积量显著低于其他水氮耦合处理。综合黄瓜生长、土壤硝态氮淋洗等因素考虑, 交替水氮异区处理是最佳的水氮耦合处理方式。

**关键词:** 局部根区灌溉; 水氮耦合; 硝态氮; 黄瓜

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)02-0006-05

中图分类号: S154, S147, S274

## Coupling Effects of Water and Nitrogen Application with Partial Root-zone Irrigation on Growth of Cucumber and Nitrate Nitrogen Distribution in Soil

ZHU Peng-fei, WU Shen, SHU Liang-zuo, LIU Fei, ZHU Ke-ya, GUO Jia-xun

(College of Life Science, Huaibei Normal University, Key Laboratory of Plant Resources and Biology of Anhui Province, Huaibei, Anhui 235000, China)

**Abstract:** Coupling effects of water and nitrogen application on the growth of cucumber and the distribution and accumulation of nitrate nitrogen in facility soil were studied under partial root-zone irrigation (PRI). The experimental factors included irrigation amount, irrigation method (whole root-zone irrigation; alternate partial root-zone irrigation, APRI; fixed partial root-zone irrigation, FPRI), and supply position of water and nitrogen in different root-zones. The results indicated that there was an interaction among the experimental factors studied regarding shoot biomass and cucumber yields. The shoot biomass and cucumber yield under deficient irrigation were relative lower than that under full irrigation for the same irrigation method. The shoot biomass and cucumber yield were significantly higher in APRI than whole root-zone irrigation if same amount of water was supplied. The highest shoot biomass and cucumber yield were observed in the APRI treatment with rotated irrigation and application of nitrogen, reaching  $1\ 143\ \text{kg}/\text{hm}^2$  (dry weight) and  $1.75 \times 10^5\ \text{kg}/\text{hm}^2$  (fresh weight), respectively. Cucumber growth decreased in FPRI, especially when nitrogen fertilizer was supplied to the non-irrigated furrow. In terms of both shoot biomass and cucumber growth, no significant difference was observed between the treatment with fully irrigated root-zone and APRI under deficient irrigation condition. Nitrate distribution in soil profile was examined under APRI and FPRI with sufficient irrigation. The

收稿日期: 2012-02-08

修回日期: 2012-05-01

资助项目: 国家自然科学基金项目“局部根区灌溉下水氮耦合效应以及对土壤中氮迁移利用的影响”(31071868); 教育部高校留学回国人员科研项目: 资源植物生物学安徽省重点实验室开放基金项目(KLPRB200901)

作者简介: 祝鹏飞(1979—), 男(汉族), 安徽省淮北市人, 硕士, 讲师, 主要从事农业资源与环境、土壤修复研究。E-mail: zpfhp@163.com。

通信作者: 束良佐(1969—), 男(汉族), 安徽省芜湖县人, 博士, 教授, 主要从事植物营养与环境植物学研究。E-mail: shulz69@163.com。

results revealed that nitrogen fertilizer application could cause nitrate accumulation in soil, and vertical movement of water down soil profile was the main factor affecting nitrate leaching. Nitrate leaching was reduced in PRI treatment with nitrogen fertilizer applied to non-irrigated furrow in comparison to applied to the irrigated furrow. Nitrate nitrogen was mainly accumulated in upper 110 cm of the soil profile for the APRI treatment with nitrogen fertilized to the non-irrigated furrow, and its nitrate accumulation in deep soil profile was relatively significantly lower than the other treatments. In conclusion, APRI with nitrogen fertilizer applied to the non-irrigated furrow is a better strategy balancing both cucumber growth and nitrate leaching.

**Keywords:** partial root-zone irrigation; coupling of water and nitrogen; nitrate nitrogen; cucumber

探讨新的节水灌溉技术,提高农业生产中的水分利用效率,是当前农业发展中的首要问题<sup>[1]</sup>。在诸多的节水灌溉方式中,局部根区灌溉(也称局部根区干燥技术,partial root-zone drying, PRD)越来越受到广泛关注,并在实践中得到应用和推广<sup>[2]</sup>。局部根区灌溉通过一定的灌溉措施,形成根区土壤水分的不均匀分布,使处于干燥侧根区的根系受水分胁迫而产生根源信号,从而调节气孔开度以及蒸腾作用,减小水分消耗;局部根区灌溉能够降低土壤湿润面积,减少棵间土壤水分无效蒸发损失。因此局部根区灌溉能够大幅度提高水分利用效率<sup>[3-5]</sup>。

在农业实践中,农民为了获得较高的产量和经济效益,盲目施用氮肥与灌溉,不仅造成水资源浪费,而且由于大量氮肥的投入,农田生态系统中氮素总体上处于盈余状态,并呈现持续增长的趋势,在蔬菜生产上这些问题更为突出。过量施用氮肥不仅影响蔬菜的产量与品质,也易引起诸多的环境问题。而最具有普遍性的问题是土体中累积的硝态氮若不及时被作物吸收利用,就逐渐向下移出作物根区,降低了其生物有效性,并造成土壤深层硝态氮的积累或污染地下水<sup>[6-7]</sup>。解决土壤剖面中硝态氮的累积问题,主要依靠氮肥施用与灌溉的合理结合,进行水氮资源的综合管理。局部根区灌溉作为一种新的节水灌溉方式,必须结合相应的施肥措施,才能充分发挥它的节水和增产潜力,以及提高肥料的利用率。因此局部根区灌溉下的水氮耦合效应方面的研究越来越受到重视。在农业生产中,农民有随水冲肥(氮)的习惯(即“水氮同区”),但从增加氮在土壤中残留与减少淋洗风险考虑,在局部根区灌溉条件下氮肥宜施在不灌溉的一侧(即“水氮异区”)<sup>[8-10]</sup>。目前国内外关于局部根区灌溉下不同水氮耦合(供应量、供应部位)的研究多是集中在其节水效应、对水肥吸收利用效率以及对大田作物生长和产量的影响等方面的探讨<sup>[11-12]</sup>,而对于在局部根区灌溉下,不同水氮耦合措施对蔬菜生长的影响以及对设施土壤剖面中氮的累积迁移缺乏研究。

黄瓜是重要的蔬菜之一,生产过程中需要大肥大水。本研究以黄瓜为试验对象,研究不同的水氮耦合

效应(灌水量、灌溉方式、水氮根区供应位置)对设施黄瓜生长及土壤中硝态氮分布和累积的影响,以丰富局部根区灌溉理论,为节水灌溉中水肥高效利用及降低土壤环境风险提供理论依据和试验支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验于 2010 年 8—11 月底在淮北市无公害蔬菜基地涝汪示范园设施大棚内进行。该地区属典型的暖温带湿润气候,年平均无霜期 202 d,年平均相对湿度 71%,日照时数 2315.8 d。大棚内昼夜温度范围在 15~28℃。土壤为砂壤土,0—20 cm 土层的土壤基本理化性质为:pH 值为 7.20,有机质含量为 16.9 g/kg,全磷含量为 0.81 g/kg,全氮含量为 2.46 g/kg,硝态氮含量为 33.08 mg/kg,铵态氮含量为 9.03 mg/kg。

### 1.2 试验设计

供试黄瓜(*Cucumis sativus* L.)品种为当地种植较广的津春 3 号。在温室中布置小区试验,小区中进行垄上种植。施肥量与施肥方式参照当地农民习惯。定植前深翻土壤,施有机肥 45 000 kg/hm<sup>2</sup>(含全氮 10.59 g/kg,全磷 6.26 g/kg,全钾 12.44 g/kg)作基肥。开沟起垄,沟长 6.5 m,沟深 15 cm,沟宽 45 cm。垄长 6.5 m,宽 50 cm。每垄定植一行黄瓜,株距 45 cm。为减少处理间水分侧向入渗,各小区间以 1 沟 1 垄作为保护带。

黄瓜于 2010 年 7 月 15 日育苗,8 月 28 日定植,苗生长初期常规灌水。氮肥以复合肥(N:P:K=17:17:17)形式追施,以 300 N kg/hm<sup>2</sup> 折算后分成两次,分别在黄瓜初花期(9 月 28 日)及结果期(10 月 31 日)在相应沟中开沟施入,然后覆土,垄上不施。第一次追肥时即进行不同灌溉处理。正常灌溉量灌至两侧沟土壤 0—40 cm 土层水分达到 90%田间持水量。共设置 8 种水氮耦合处理方式(表 1),每处理重复 3 次。第 1 次灌溉处理时正常灌水量每小区 96 L,亏缺灌水量减少 1/2。10 月 7 日与 10 月 18 日两次补水,按照第 1 次追肥时灌水的位置相应进行均

匀、固定或交替灌水,正常灌水量 54 L,亏缺灌水量减半。第 2 次追肥时,追施肥量及浇水量同第 1 次,

固定根区灌溉处理水氮施入位置不变,交替灌溉处理把水分交替到原先干燥侧。

表 1 设施黄瓜局部根区水氮耦合处理设置

| 处理名称     | 处理代号 | 处理内容   |
|----------|------|--|
| 正常均水均氮   | NCK  | 两侧沟均灌溉,氮肥追施在两侧。  |
| 正常固定水氮同区 | NFT  | 固定在一侧沟灌溉,另一侧沟不灌溉,氮肥追施在灌溉侧,灌溉量与施氮量同 NCK。                          |
| 正常固定水氮异区 | NFY  | 氮肥施用在非灌溉侧,其它同 NFT。   |
| 正常交替水氮同区 | NAT  | 灌溉时只灌溉一侧沟,另一侧不灌溉而令其干燥,下次灌溉时水分供应到原先的干燥侧,原灌溉侧不灌溉,即进行交替灌溉,氮肥追施在灌溉侧。 |
| 正常交替水氮异区 | NAY  | 氮肥追施在干燥侧,其它同 NAT 处理。   |
| 亏缺均水均氮   | DCK  | 灌溉量减少 1/2,其它同 NCK 处理。  |
| 亏缺固定水氮同区 | DFT  | 灌溉量减少 1/2,其它同 NFT 处理。  |
| 亏缺交替水氮同区 | DAT  | 灌溉量减少 1/2,其它同 NAT 处理。  |

### 1.3 样品采集与测定

黄瓜定期采摘并称鲜重,最后汇总得出各处理产量。2010 年 11 月 25 日收获黄瓜植株,小区内所有植株地上部茎叶全部收获,烘干称重,计算地上部生物量(干重)。

植株收获后,选择正常水分灌溉下的 4 个处理,即正常固定水氮同区(NFT)、正常固定水氮异区(NFY)、正常交替水氮同区(NAT)、正常交替水氮异区(NAY)处理,用土钻在垄的两侧沟正中间向下采集土壤剖面样品。0—80 cm 土层每间隔 20 cm 依次取样,80—170 cm 土层每间隔 30 cm 依次取样。土壤样品采集后,用塑料袋密封,迅速带回实验室测定。

称取 10 g 土壤,加入 2 mol/L 的 KCl 浸提,土液比 1:5,恒温振荡器振荡 1 h,悬液静置 3~5 min 后过滤,硝态氮采用连续流动分析仪(AA3,德国 BRAN+LUBBE)测定。同时采用重量法测定土壤含水率。

根据土壤容重(表 2)计算土壤剖面硝态氮含量,计算公式为:

$$\text{NO}_3^- \text{—N 含量}(\text{kg}/\text{hm}^2) = \text{土层厚度}(\text{cm}) \times \text{土壤容重}(\text{g}/\text{cm}^3) \times \text{土壤 NO}_3^- \text{—N 含量}(\text{mg}/\text{kg}) \times 0.1。$$

表 2 试验区剖面不同深度土壤的容重

| 土层深度/cm | 容重/(g·cm <sup>-3</sup> ) |
|---------|--------------------------|
| 0—20    | 1.38                     |
| 20—40   | 1.60                     |
| 40—60   | 1.71                     |
| 60—80   | 1.52                     |
| 80—110  | 1.57                     |
| 110—140 | 1.58                     |
| 140—170 | 1.50                     |

## 2 结果与分析

### 2.1 局部根区灌溉水氮耦合对黄瓜生长的影响

水和氮是影响作物生长的两个重要因素。局部

根区灌溉下不同水氮耦合作用对黄瓜地上部生物量及产量的影响由图 1 所示。

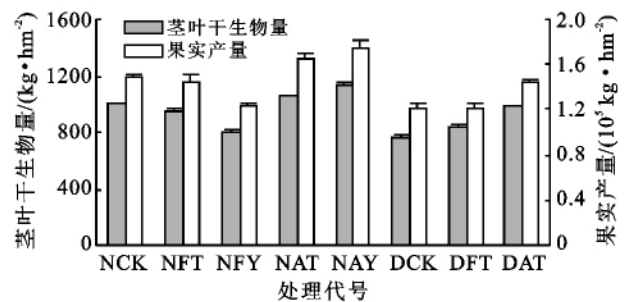


图 1 研究区局部根区灌溉水氮耦合对黄瓜生长的影响

注:各处理代号内容详见表 1。下同。

可见,灌水量、灌溉方式、水氮位置存在着不同的交互作用。其中,NAY 处理黄瓜地上部生物量及果实产量最大,分别达到 1 143 kg/hm<sup>2</sup>(干重)和 1.75 × 10<sup>5</sup> kg/hm<sup>2</sup>(鲜重)。亏缺灌水量条件下水氮同区处理的茎叶生物量及黄瓜产量均低于相应灌溉方式下的正常灌水量处理,其中固定同区(DFT)地上部生物量及产量分别降低 13% 和 17%,交替同区(DAT)降低 7% 和 12%。而均水均氮 DCK 处理的地上部生物量及产量分别低于正常水量处理(NCK)约 23% 和 20%。不同水量与灌溉施肥方式耦合效应比较表明,固定水氮异区(NFY)的茎叶生物量及产量低于 NCK,而 NAT 和 NAY 均大于 NCK;灌溉量降低 1/2 的 DAT 处理与 NCK 处理没有明显差异,表明交替根区灌溉能够促进生长,且在亏缺灌溉下有利于维持黄瓜的生长与产量。已有研究表明<sup>[13]</sup>,作物对肥料的吸收受水分吸收的影响,减少对作物的水分供应可减少其对氮素的吸收。固定水氮异区处理水氮分别施用在一侧沟,施氮一侧根系在整个生长期中处于水分胁迫状态,可能降低了黄瓜对氮素营养的吸收,进而影响了其生长;而交替根区灌溉能够有效地调节

作物的生理,并可能通过减少氮的淋洗从而增加了氮素的吸收,促进了黄瓜的生长<sup>[14]</sup>。

## 2.2 局部根区灌溉水氮耦合对土壤中硝态氮分布的影响

硝态氮不易被土壤胶体吸附,极易随水移动。大量研究表明<sup>[15]</sup>,蔬菜生产中施入的氮肥一部分可迁移至作物根区被吸收利用,另一部分残留在土壤中,或继续向下淋洗。而土壤硝态氮的淋失与土壤水分有关,且不同的灌溉方式影响土壤水分运移,从而可能影响硝态氮的分布与迁移<sup>[16]</sup>。本试验对正常灌水量条件下局部根区水氮耦合对设施土壤中硝态氮分布的影响进行了研究,结果由图 2 所示。从图 2 可以看出,各种水氮耦合处理下层 0—20 cm 土层硝态氮含量较高,所有追肥处理一侧的土壤硝酸盐含量均高于 NFT<sub>2</sub>。NFY<sub>1</sub> 侧两次追施肥但未灌水, NAY<sub>2</sub> 处理第 2 次追肥后也未灌水,淋溶弱,因此硝酸盐大量积累,含量分别达到 104.66 和 104.95 mg/kg,均显著高于其他处理对应土层。NFY<sub>2</sub> 侧只灌水而未追肥,因此受到水的淋溶,表层硝态氮含量低于 NFT<sub>2</sub>。交替根区灌溉下,水氮异区处理一侧施氮同时在另一侧浇水,硝态氮的淋洗存在一定的时滞,而水氮同区处理施氮同时即受到水的淋洗,因此 NAT<sub>1</sub> 和 NAT<sub>2</sub> 处理 0—20 cm 土层土壤硝态氮含量均低于 NFY<sub>1</sub> 和 NFY<sub>2</sub>。

各种水氮耦合处理 20—40 cm 土层土壤硝态氮含量有明显降低。这是由于黄瓜根系属浅根系,垂直方向分布在 0—50 cm,且随深度增加,根系减少<sup>[17]</sup>。根系的集中分布使得土壤硝酸盐被大量吸收;随土层深度增加,根系减少,根系的影响渐弱,从而使硝态氮向下的淋洗逐渐增强。

40—140 cm 土层呈现出硝酸盐大量积累并向下降淋洗的现象。除 110—140 cm 土层以外,各追施氮肥一侧相应土层的土壤硝酸盐含量均大于 NFT<sub>2</sub>(未追肥,未灌溉侧),表明施氮易造成土壤中硝态氮积累。40 cm 以下土层中, NFY<sub>2</sub> 的硝态氮含量均大于 NFT<sub>2</sub> 对应土层,可能是由于上面土层的硝态氮迁移到 40 cm 以下累积造成的,表明土壤水分的垂向运动是影响硝态氮分布的一个主要因子。固定根区灌溉下, NFT<sub>1</sub> 在 140—170 cm 呈现硝态氮的高峰值并仍有可能继续增加的趋势,表明固定水氮同区有加剧硝态氮向下淋洗的趋势。交替水氮同区处理中, NAT<sub>1</sub> 和 NAT<sub>2</sub> 分别在 80—110 和 110—140 cm 土层达到高峰值,且在 80 cm 以下观察到 NAT<sub>1</sub> 累积的硝态氮比 NAT<sub>2</sub> 高,表明灌溉逐渐促进氮向深层淋洗。交替水氮异区处理中, NAY<sub>1</sub> 和 NAY<sub>2</sub> 分别在 60—80 和 40—60 cm 出现高峰值,硝态氮向下淋洗相对较弱。各处理在剖面 140 cm 以下土壤硝态氮含量呈逐渐减少的趋势。

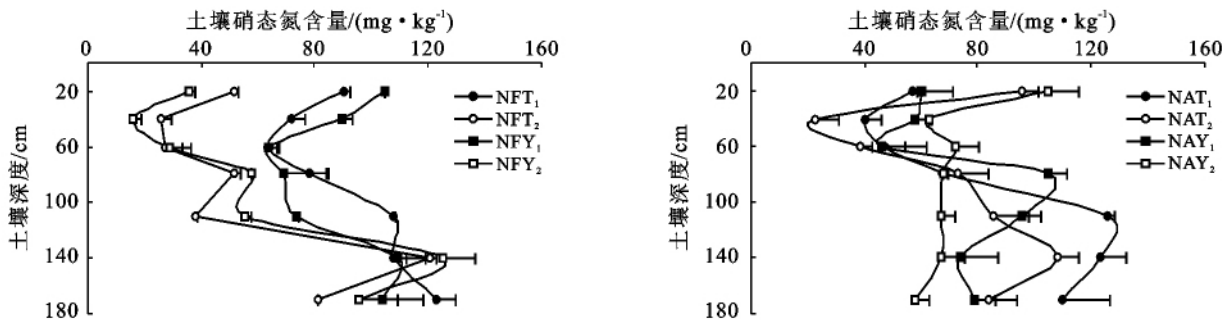


图 2 局部根区灌溉水氮耦合对土壤中硝态氮分布的影响

注:处理代号后下标“1”表示该处理的追肥侧(NFT<sub>1</sub>, NFY<sub>1</sub>),或者是第一次追肥侧(NAT<sub>1</sub>, NAY<sub>1</sub>);处理代号后下标“2”表示该处理的未追肥侧(NFT<sub>2</sub>, NFY<sub>2</sub>),或者是第二次追肥侧(NAT<sub>2</sub>, NAY<sub>2</sub>)。

## 2.3 局部根区水氮耦合对土壤中硝态氮累积量的影响

土壤硝态氮累积总量与施入到土壤—作物系统中的氮肥用量、氮肥种类、气候条件、土壤—作物系统的组合特征及水分条件等因素有关。本研究涉及的各项处理中,灌水量、氮肥种类及用量一致,而水氮耦合方式不同。局部根区灌溉下水氮耦合对土壤中硝态氮累积量的影响详见图 3 和表 3。

由图 3 可见,80 cm 以上土层中, NAY 处理硝态氮累积要高于其他处理,而 80 cm 以下各土层中, NAY 处理硝态氮累积少于其他 3 种处理方式。由表 3 可见, NAY 处理中 0—60 cm 硝态氮累积量占 0—170 cm 累积量的 31%,比其他处理高出 7%~10%,这部分氮素能被作物吸收利用;60—110 cm 硝态氮累积量占整个 0—170 cm 累积量的 34%,也高于其他

处理,这部分氮素可以丰富底土氮素数量,但也有潜在淋失的可能。110 cm 以下土层中残留的氮素很难被作物利用,可视为淋失氮素,总是一个向下迁移的过程,随时间推移,这部分氮素既可损失,也可污染地下水源。NAY 处理 110—170 cm 土层硝态氮累积量占 0—170 cm 累积量的 35%,显著低于其他 3 种处理。说明不同的水氮耦合方式影响硝态氮在土壤剖面中的累积与分布。在本研究中的 4 种局部根区水氮耦合处理方式中,NAY 处理硝态氮在 0—110 cm 土层中累积较高,深层淋洗相对较弱。

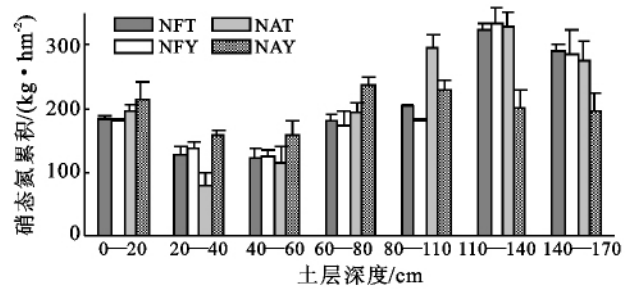


图 3 局部根区灌溉水氮耦合对单位土层深度土壤硝态氮累积的影响

注:各层土壤均以 10 cm 深度进行计算。

表 3 局部根区灌溉下水氮耦合对不同土层深度硝态氮累积的影响

| 处理代号 | 0—60 cm 土层                   |      | 60—110 cm 土层                 |      | 110—170 cm 土层                |      |
|------|------------------------------|------|------------------------------|------|------------------------------|------|
|      | 累积量/(kg · hm <sup>-2</sup> ) | 比例/% | 累积量/(kg · hm <sup>-2</sup> ) | 比例/% | 累积量/(kg · hm <sup>-2</sup> ) | 比例/% |
| NFT  | 870.69±67.08                 | 24   | 973.76±28.51                 | 26   | 1 852.58±54.51               | 50   |
| NFY  | 891.27±47.63                 | 24   | 892.44±55.04                 | 25   | 1 854.77±212.23              | 51   |
| NAT  | 790.72±108.00                | 21   | 1 277.32±94.26               | 33   | 1 779.43±153.60              | 46   |
| NAY  | 1 063.62±118.88              | 31   | 1 163.39±72.44               | 34   | 1 190.26±176.02              | 35   |

### 3 结论

(1) 通过对局部根区灌溉下不同水氮耦合对黄瓜地上部生物量及果实产量的分析表明,NAY 处理黄瓜地上部生物量及果实产量最高。灌水量、灌溉方式、水氮位置存在着不同的交互作用。不同灌水量条件下,亏缺水量处理的地上部生物量及产量均低于相应的正常水量处理。在正常灌水量条件下,交替根区灌溉的黄瓜生物量与产量显著高于两侧均水均氮处理,而固定根区灌溉下,尤其在水氮异区条件下,生物量与产量则下降。与常规灌溉相比,交替根区灌溉能够在灌溉量降低 1/2 的情况下维持黄瓜的生物量与产量。

(2) 通过对局部根区灌溉下不同水氮耦合对土壤中硝态氮分布的分析表明,施氮一侧土壤硝态氮含量绝大多数高于未施氮一侧,表明施氮是造成土壤中硝态氮积累的原因。不同水氮耦合处理下,土壤硝态氮含量的变化趋势相似,但不同土层深度的分布有较大的差异,其中,NFT 和 NAT 处理硝态氮向下淋洗较强,而 NAY 处理的氮素主要累积在 0—110 cm 土层中,淋洗相对较弱。综合黄瓜生长、土壤硝态氮淋洗等因素考虑,交替水氮异区处理是最佳的水氮耦合处理方式。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 潘丽萍,李彦,唐立松. 局部根区灌溉对棉花主要生理生态特性的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(8):2982-2986.

- [2] Kang Shaozhong, Zhang Jianhua. Controlled alternate partial root-zone irrigation: Its physiological consequences and impact on water use efficiency[J]. Journal of Experimental Botany, 2004,55(407):2437-2446.
- [3] Bravdo B, Naor A, Zahavi T, et al. The effect of water stress applied alternately to part of the wetting zone along the season (PRD-partial rootzone drying) on wine quality, yield and water relations of red wine grapes[J]. Acta Horticulturae, 2004, ISHS(664):101-109.
- [4] Dodd I C, Theobald J C, Bacon M A, et al. Alternation of wet and dry sides during partial rootzone drying irrigation alters root-to-shoot signalling of abscisic acid[J]. Functional Plant Biology, 2006,33(12):1081-1089.
- [5] Neales T F, Masia A, Zhang Jianhua, et al. The effects of partially drying part of the root system of *Helianthus annuus* on the abscisic acid content of the roots, xylem sap and leaves [J]. Journal of Experimental Botany, 1989,40(10):1113-1120.
- [6] Jackson L E. Fates and losses of nitrogen from a nitrogen-15-labeled cover crop in an intensively managed vegetable system[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(4):1404-1412.
- [7] Waddell N A T, Gupta S C, Moncrief J F, et al. Irrigation and nitrogen management impacts on nitrate leaching under potato[J]. Journal of Environmental Quality, 2000,29(1):251-261.
- [8] Benjamin J G, Porter L K, Duke H R, et al. Corn growth and nitrogen uptake with furrow irrigation and fertilizer bands[J]. Agronomy Journal, 1997,89(4):609-612.

(下转第 16 页)

- 壤侵蚀的影响[J]. 地理科学进展, 2003, 22(6): 576-584.
- [4] 刘艳锋, 陈学华, 贺秀斌. 岷江上游土壤侵蚀与土地利用的耦合关系研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(5): 161-165.
- [5] 樊哲文, 黄灵光, 钱海燕. 鄱阳湖流域土地利用变化的土壤侵蚀效应[J]. 资源科学, 2009, 31(10): 1787-1791.
- [6] 张胜利, 于一鸣, 姚文艺. 水土保持减水减沙效益计算方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
- [7] 姚文艺, 李占斌, 康玲玲. 黄土高原土壤侵蚀治理的生态环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [8] 倪晋仁, 李英奎. 基于土地利用结构变化的水土流失动态评估[J]. 地理学报, 2001, 5(56): 611-620.
- [9] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses[R]. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service Handbook, 1978.
- [10] 张胜利, 李倬, 赵文林, 等. 黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因及发展趋势[M]. 河南 郑州: 黄河水利出版社, 1998.
- [11] 刘秉正. 渭北地区 R 的计算与分布[J]. 西北林学院学报, 1993(2): 21-29.
- [12] 江忠善. 黄土高原水土流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究[J]. 西北水保所集刊, 1988(7): 40-45.
- [13] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报, 1996, 16(5): 1-19.
- [14] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J]. 自然资源学报, 1999, 14(4): 345-350.
- [15] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 607-613.
- [16] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2003.
- [17] 陈利顶, 张淑荣, 傅伯杰, 等. 流域尺度土地利用与土壤类型空间分布的相关性研究[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2497-2505.
- [18] 孙建光, 李保国, 卢琦. 青海共和盆地草地生产力模拟及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2005, 27(4): 44-49.
- [19] Anne M, Sylvie L, Nathalie C, et al. Agricultural land use change and its drivers in mountain in landscapes: A case study in the Pyrenees[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, 114(2/4): 296-310.
- [20] 闫小培, 毛蒋兴, 普军. 巨型城市区域土地因变化的人文因素分析[J]. 地理学报, 2006, 61(6): 613-623.
- [21] 李壁成. 小流域水土流失与综合治理遥感监测[M]. 北京: 科学出版社, 1995.

(上接第 10 页)

- [9] Skinner R H, Hanson J D, Benjamin J G. Root distribution following spatial separation of water and nitrogen supply in furrow irrigated corn[J]. Plant and Soil, 1998, 199(2): 187-194.
- [10] Lehrsch G A, Sojka R E, Westermann D T. Nitrogen placement, row spacing, and furrow irrigation water positioning effects on corn yield[J]. Agronomy Journal, 2000, 92(6): 1266-1275.
- [11] 刘小刚, 张富仓, 田育丰. 交替隔沟灌溉和施氮对玉米根区水氮迁移的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 2025-2032.
- [12] Hu Tiantian, Kang Shaozhong, Li Fusheng, et al. Effects of partial root-zone irrigation on the nitrogen absorption and utilization of maize[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(2): 208-214.
- [13] 樊小林, 李玲, 何文勤, 等. 氮肥、干旱胁迫、基因型差异对冬小麦吸氮量的效应[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 131-137.
- [14] 刘小刚, 张富仓, 杨启良, 等. 控制性分根区灌溉对玉米根区水氮迁移和利用的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 62-67.
- [15] 柏廷芳, 张海, 张立新. 氮肥对黄土高原大棚蔬菜及土壤硝酸盐累积的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 555-559.
- [16] 谭军利, 王林权, 王西娜, 等. 不同灌水模式对土壤水分和硝态氮分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(5): 29-33.
- [17] 陈志杰, 张锋, 梁银丽, 等. 不同灌溉方式对温室嫁接黄瓜根系分布影响的研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 874-877.